

780 nm LAZER DALGABOYU STANDARDI MUTLAK FREKANS VE KARARLIĞI ÖLÇÜMLERİ

Ersoy ŞAHİN

ÖZET

Bu çalışmada; uzunluk ve boyutsal ölçümleri için TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsünde geliştirilmiş, frekansları ^{87}Rb atomlarının geçişlerine kilitlenerek kararlı hale getirilmiş, $\lambda = 780$ nm dalga boyu taşınabilir ulusal dalga boyu standartları oluşumundan bahsedilmiştir. Yapılan frekans kararlığı ölçümleri ile ulusal dalga boyu standartları frekans kararlığı 1s ile 16 saat zaman aralığında $5.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ olarak belirlenmiştir. Dalga Boyu Standartları mutlak frekansına etki eden parametreleri; ^{87}Rb küvet sıcaklığı 4.528 ± 0.781 kHz / °C, lazer ışınım yoğunluğu 0.956 ± 0.061 kHz cm^2 / mW ve frekans modülasyon genişliği 5 ± 0.977 kHz / MHz olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dalga boyu standardı, frekans kararlığı, ^{87}Rb küvet sıcaklığı, lazer ışınım yoğunluğu, frekans modülasyon genişliği.

ABSTRACT

In this study, for length and dimensional measurements, the realization of $\lambda = 780$ nm transportable national wavelength standards, developed at TÜBİTAK National Metrology Institute, were mentioned. The frequency stabilization of the national wavelength standards were done by locking the energy transition of ^{87}Rb atoms. With frequency stabilization measurements the frequency stabilization value of national wavelength standards was defined $5.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ integration times 1s to 16 hours. The parameters which are affecting the absolute frequency of national wavelength standards; the temperature of ^{87}Rb cell 4.528 ± 0.781 kHz / °C, laser intensity 0.956 ± 0.061 kHz cm^2 / mW and frequency modulation width 5 ± 0.977 kHz / MHz were measured.

Key Words: Wavelength standard, frequency. stabilization, temperature of ^{87}Rb cell, laser intensity, frequency modulation width

1. GİRİŞ

Uzunluk ve boyutsal ölçümlerinde Uluslararası Ağırlıklar ve Ölçüler Bürosu'nun (Bureau International des Poids et Mesures ,BIPM) tanımı gereğince [1] gerçekleştirilmiş dalga boyu standartları kullanımı zorunluluğu vardır. Bu tanım gereğince kullanılabilecek uzunluk dalga boyu standartlarından biride 780 nm dalga boyunda çalışan frekansı ^{87}Rb atomlarının d/f enerji geçişine kilitlenerek frekansı kararlı hale getirilmiş dış kaviteli diyot lazer sistemidir. BIPM'in tanımı gereğince uzunluk ve boyutsal ölçümlerinde kullanılacak dalga boyu standardının (lazerin) frekansındaki değişim ($\Delta\vartheta / \vartheta$) değerinin 5×10^{-10} olması gerekmektedir. Tanım gereğince mutlak frekansın $\vartheta = 384\,227\,981.9$ MHz olduğunda mutlak frekanstaki değişimin $\Delta\vartheta \approx 192$ kHz olması anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle mutlak frekans bu değişim değerine sahip bir lazer ile interferometrik yöntem ile $L = 1$ m uzunluğuna sahip master (gauge) bloğun uzunluğunu ölçtüğümüzde $\Delta L \approx 0.5$ nm bir hata getireceğini ifade etmektedir. Bu düşük hata değerine sahip uzunluk ölçümünü gerçekleştirebilmek için, uzunluk ölçümünde kullanılacak lazerin hem mutlak frekans kararlılık değeri hem de mutlak frekansına etki eden

parametrelerin kontrol altında tutulması gerekmektedir. Lazerin mutlak frekansındaki değişim uzunluk ölçümünün doğruluğunu (accuracy) belirlerken, mutlak frekans kararlılığı ise ölçümün tekrarlanabilirliğini (repeatability) belirlemektedir.

2. 780 nm LAZER DALGABOYU STANDARDI

TUBİTAK UME'de 780 nm lazer dalga boyu standardı oluşumunu gerçeklemek için; 780 nm dalga boyunda ışınım veren, lazer çizgi genişliği 200 kHz'den küçük, lazer gücü 50 mW olan dış kaviteli diyot lazer kullanılmıştır. Lazerin frekansı kararlılığı üçüncü harmonik frekans kilitleme yöntemi ile kullanılarak sağlanmıştır [2]. Lazerin frekansını kararlı hale getirmekte kullanılan hata sinyali Doppler – altı doyum soğurum spektroskopisi [2] yöntemi ile elde edilmiştir. Hata sinyalini elde etmek için; lazer ışınımı sıcaklık kontrollü cam küvet içerisinde yer alan ^{87}Rb atomları ile etkileşime sokulmuş ve hata sinyali fotodetektör ile algılanmıştır. Hata sinyalinin üçüncü türevini almak için lazerin akımı lock in yükselticiden elde edilmiş 33.8 kHz'lik sinüs sinyali ile modüle edilmiş ve oluşan hata sinyalinin üçüncü türevi lazerin akım ve piezo - elektrik transdüser'ine ayrı ayrı geri besleme sinyali olarak uygulanmıştır. Lazer akımına verilen hata sinyali lazerin frekansındaki hızlı değişimleri (örneğin akustik gürültüden kaynaklanan lazer frekans değişimi) kompanze ederken, piezo - elektrik transdüser'ine verilen hata sinyali lazerin frekansındaki yavaş değişimleri (örneğin sıcaklık değişiminden dolayı lazer frekans değişimi) kontrol altında tutmak amaçlı verilmiştir. ^{87}Rb atomlarının enerji geçişlerinin dış manyetik alandan etkilenmesini önlemek için, cam küvet içerisinde yer alan ^{87}Rb atomları dış manyetik alan etkisini zayıflatan manyetik izolasyon malzemesi (MuMetal material) ile iki katlı katman olacak biçimde sarılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda dış manyetik alanın yirmi beş kat azaltığı ölçülmüştür. Ulusal uzunluk standardının kurulduğu optik masada manyetik alan $\approx 50 \mu\text{T}$ ölçülmüştür. Bu ölçüm ^{87}Rb atomlarının $\approx 2 \mu\text{T}$ 'lık yerin manyetik alanından kaynaklanan bir alana maruz kaldığı anlamına gelmektedir. Bu alan ulusal uzunluk standardının mutlak frekansında $\leq 500 \text{ Hz}$ 'lik değişime, frekans kararlılığında ise 10^4 s'lik ortalama süresince $\leq 50 \text{ Hz}$ 'lik kaymaya neden olduğu saptanmıştır [3].

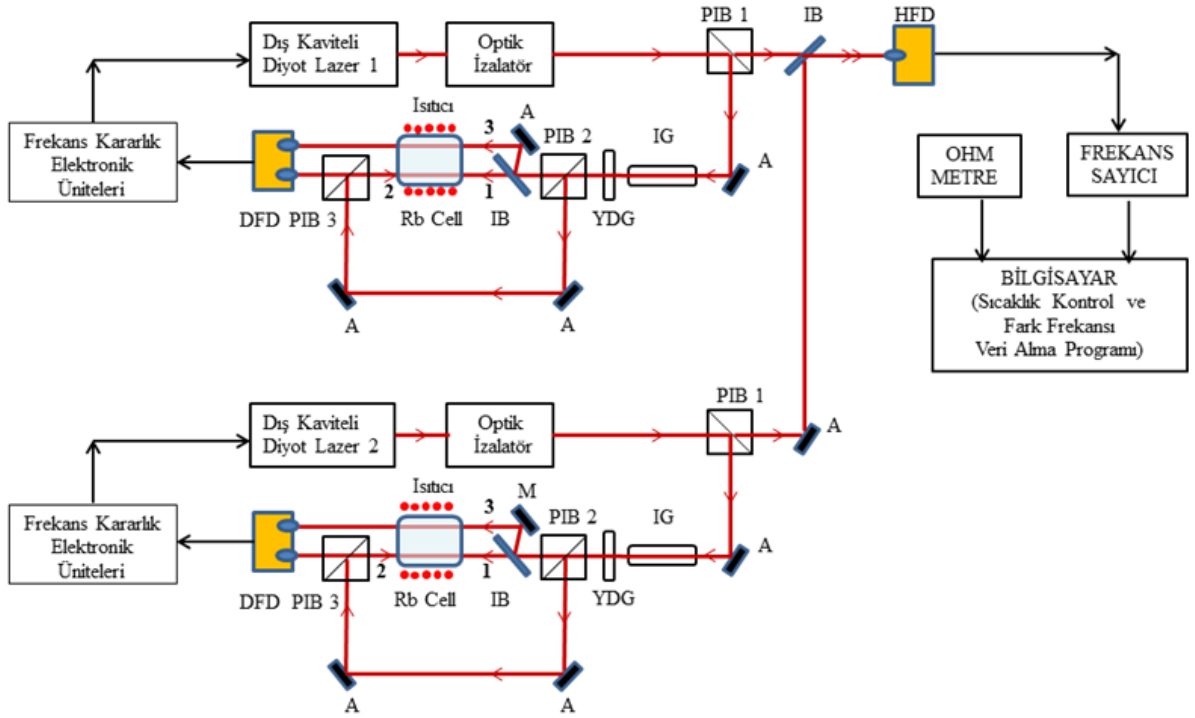
Dalga boyu standardının oluşumu gerçekleşirken mutlak frekansını belirleyen fiziksel parametreler ^{87}Rb küvet sıcaklığı, lazer ışınım yoğunluğu ve frekans modülasyon genişliği BIPM'in [1] tanımı doğrultusunda belirlenmiştir. Tanım doğrultusunda ^{87}Rb küvet sıcaklığı: $23.3 \text{ }^\circ\text{C}$, lazer ışınım yoğunluğu: 100 mW/cm^2 ve frekans modülasyon genişliği: 5 MHz olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerden dalga boyu standardının frekans kararlılığını etkileyen ^{87}Rb küvet sıcaklık kararlılığı oluşumu ve kararlılığı üzerinde önemle durulmuş, çalışma sonuçları [4]'te yer almaktadır.

Lazer dalga boyu standardının frekans kararlılığı ve mutlak frekans parametrelerinin değişimini ölçmek ve belirlemek için söz konusu standardının bir benzerinin ikincisi BIPM'in tanımı doğrultusunda TUBİTAK UME'de kurulmuş ve bu iki dalga boyu standardı kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

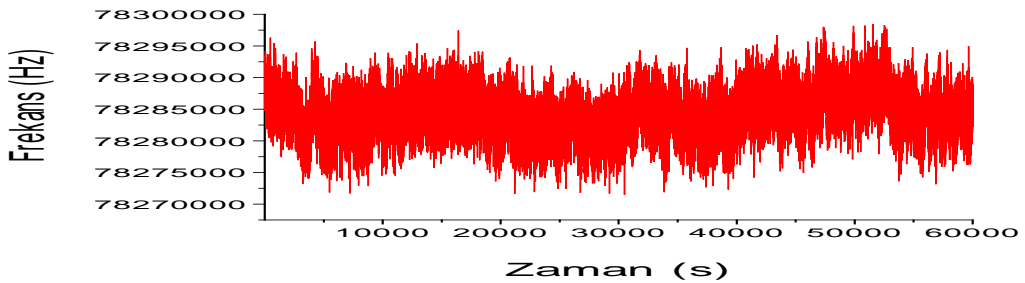
3. MUTLAK FREKANS VE KARARLIĞI ÖLÇÜMLERİ

Lazer dalga boyu standartlarının frekans kararlılığı ve mutlak frekans parametrelerinin değişimini ölçmek için şekil 1'deki ölçüm düzeneği kurulmuştur. Olası lazer ışınım geri yansımaları lazerlerin çalışma rejimini bozucu yönde etkilediğinden, dış kaviteli diyot lazerlerin önüne optik elemanlardan (aynalardan, polarize ışın bölücülerden) olası geri yansımaları engellemek için 40 dB izolasyon değerine sahip optik izolatör yerleştirilmiştir. Optik izolatörlerden çıkan lazer ışınım demetleri polarize ışın bölücü (PIB 1), aynalar (A 1) üzerinden yansıtılarak ışınım genişleticiler (IG) ve yarım dalga geciktiriciler geçirilerek polarize ışın bölücüler'den (PIB 2) kullanılarak lazer ışınımı iki kola ayrılmıştır (şekil 1'de 1 ve 2 olarak isimlendirilmiştir). Bu lazer ışınım demetlerinden 1 ile isimlendirilen Doppler – altı doyum soğurum rezonansı diferansiyel fotodetektörler (DFD) üzerinden algılamak için kullanılmıştır. Lazer ışınım demetleri 2 ise ^{87}Rb atomlarının taban enerji seviyesinin süper enerji geçişi olan $F=2$ enerji seviyesinde bulunan atomları $F'=3$ enerji üst enerji seviyesine optik pompalama için kullanılmıştır. PIB 2'den sonra konumlandırılmış ışın bölücü (IG) kullanılarak üçüncü bir lazer ışınımı

(şekil 1'de 3 olarak isimlendirilmiştir) elde edilmiş ve A4 aynası kullanılarak DFD'ye üzerine gönderilmiştir. Diferansiyel fotodetektörlere yönlendirilmiş lazer 1 ile lazer 3 ışınımı sinyal farkı alınarak, rezonans sinyali üzerinde oluşan DC offset kaldırılmıştır. Optik pompalama için kullanılan lazer ışınım demetleri 2, A2, A3 aynalarından ve polarize ışın bölücüler'den (PIB 3) yansıtılarak içerisinde ^{87}Rb atomları bulunan sıcaklıklı kontrollü cam hücreye doğru yönlendirilmiştir. Ters yönde cam hücreye gelen lazer ışınım demetleri 1 ve 2 uzaysal olarak üst üste bindirilerek oluşan Doppler – altı doyum soğurum rezonansı diferansiyel fotodetektörler (DFD) ile algılanmıştır. Lazer ışınimleri (1,2 ve 3), ışınım genişleticiler kullanılarak büyütülmüş ve demet çapı 3 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Standartların frekans kararlığı ölçümlerinde; lazer 2 ışınım yoğunlukları $\approx 0.56 \text{ mW/cm}^2$, lazer 1 ve 3 ışınım yoğunlukları $\approx 0.14 \text{ mW/cm}^2$ olarak ayarlanmıştır. Işınım yoğunluklarının bu denli düşük ayarlanması nedeni; lazerleri kararlı hale getirmekte kullanılan rezonans sinyallerinin çizgi genişliklerini artırmamak içindir çünkü frekans kararlığı rezonansın çizgi genişliği arttıkça bozulmaktadır [2].

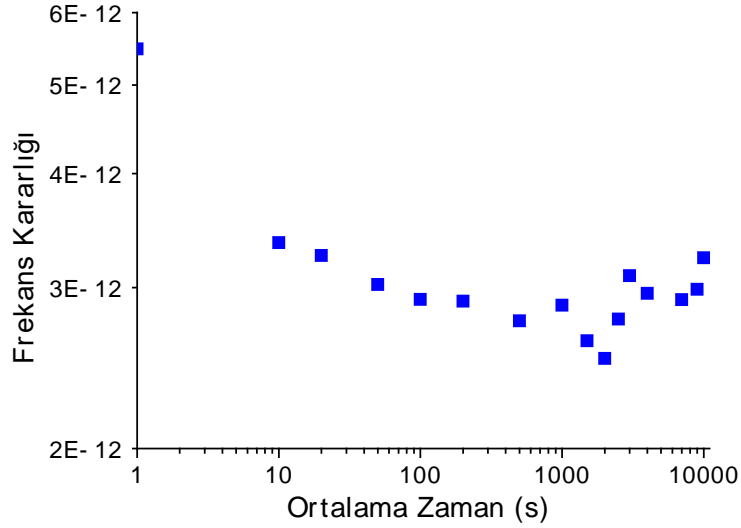


Şekil 1. Ulusal Uzunluk Dalga Boyu Standartlarının Mutlak Frekans ve Kararlığı Ölçüm Düzeneği



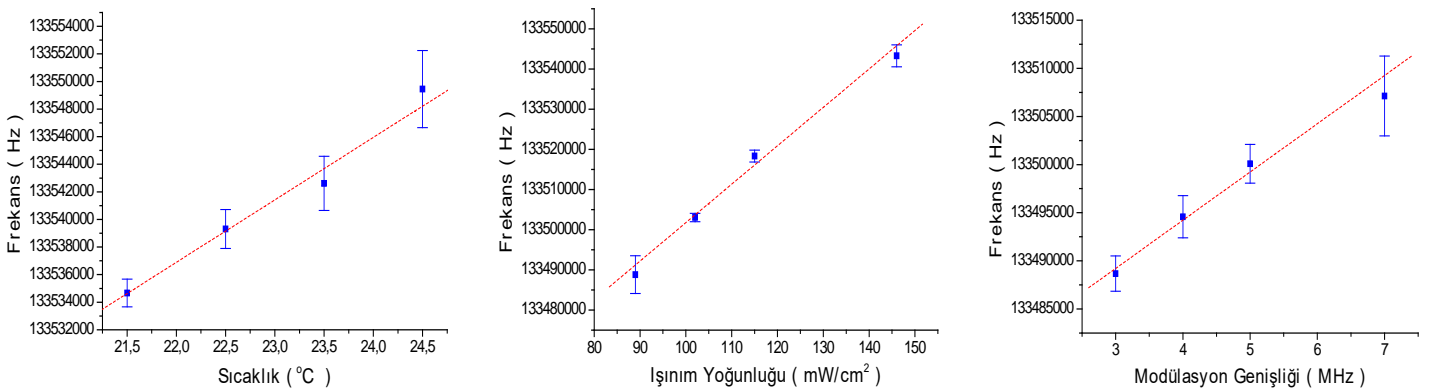
Şekil 2. Ulusal Uzunluk Dalga Boyu Standartlarının Frekansının Zaman ile Değişimi

Algılanan rezonans sinyalleri kullanılarak; lazer dalga boyu standardı 1^{87}Rb atomlarının d/f enerji geçişine, lazer dalga boyu standardı 2 ise f enerji geçişine kilitlenerek karalı hale getirilmiştir. Frekansları kararlı hale getirilmiş lazer dalga boyu standartları ışınım demetleri hızlı fotodetektör (HFD) üzerinde üst üste bindirilerek lazerler arasındaki fark frekansı, bilgisayar kontrollü frekans sayıcı ile kayıt edilmiştir. Deney düzeneğindeki bilgisayar kontrollü voltmetre, frekans kararlılığı ölçümü süresince ^{87}Rb atomlarının sıcaklık değişimini gözlemlemek ve kayıt etmek için kullanılmıştır. Şekil 2'de 60 ks (16 saat) süresince Ulusal dalga boyu standartlarının frekansının zaman ile değişimi görülmektedir.



Şekil 3. Ulusal Dalga Boyu Standartlarının Frekans Kararlılığı

Şekil 3'te 16 saat süresince kayıt edilen veri ile Allan variance [5] istatistiği kullanılarak hesaplanmış değerlerden oluşturulan, ulusal dalga boyu standartlarının frekans kararlılığını ifade eden grafik görülmektedir. Ölçümler sonucunda ulusal dalga boyu standartları frekans kararlılığı değeri 1s ile 16 saat zaman aralığında $5.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ ölçülmüş iken, ulusal uzunluk dalga boyu standartı 1'in mutlak frekansına etki eden parametreleri ^{87}Rb küvet sıcaklığı $4.528 \pm 0.781 \text{ kHz} / ^\circ\text{C}$, lazer ışınım yoğunluğu $0.956 \pm 0.061 \text{ kHz cm}^2 / \text{mW}$ ve frekans modülasyon genişliği $5 \pm 0.977 \text{ kHz} / \text{MHz}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. ^{87}Rb Küvet Sıcaklığı, Lazer Işınım Yoğunluğu, Frekans Modülasyon Genişliği Parametreleri Ölçüm Değerleri Grafikleri

SONUÇ

Bu çalışmada; TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde BIPM'in tanımı doğrultusunda gerçekleştirilmiş taşınabilir ulusal dalga boyu standartlarının oluşumu, frekans kararlılığı ve mutlak frekansına etki eden ^{87}Rb küvet sıcaklığı, lazer ışınım yoğunluğu ve frekans modülasyon genişliği parametreleri ölçüm sonuçları sunulmuştur. Ulusal dalga boyu standartların frekans kararlılığı ve mutlak frekansına etki eden parametrelerinin değerleri; standartlarının uzunluk ve boyutsal ölçümlerinde kullanılabilmesi için BIPM'in tanımı gereğince gereksinimleri karşıladığı gibi literatürde yer alan ölçüm sonuçları ile uyum göstermektedir [3,6,7,8,].

KAYNAKLAR

- [1] CIPM Recommendation 2 (CI-2015): Updates to the list of standard frequencies <http://www.bipm.org/jsp/en/CIPMRecommendations.jsp>.
- [2] Demtröder, W., Laser Spectroscopy (Second Enlarged Edition). Berlin, Springer (1996)
- [3] Affolderbach, C., Mileti, G. "Tunable, stabilised diode lasers for compact atomic frequency standards and precision wavelength references," Optics and Lasers in Engin., vol. 43, pp. 291–302, July 2004.
- [4] DENİZ, Y., GEDİK, A., ŞAHİN, E., ERKEN, N., BABA, A.F. "Lazer Dalgaboyu Standardı Atomik Gaz Sıcaklık Elektronik Kontrol Ünitesi Tasarımı ve Ölçüm Sonuçları", Ölçübilim Sempozyumu ve Sergisi / 20-22 Kasım 2019 (Bildiri olarak kabul edildi)
- [5] RILEY, W.J., "Handbook of Frequency Stability Analysis", NIST Special Publication 1065 <http://www.crya.unam.mx/radiolab/recursos/Allan/NIST-1065.pdf>
- [6] Affolderbach, C., Mileti, G. "A compact laser head with high-frequency stability for Rb atomic clocks and optical instrumentation" Review of Scientific Instruments 76, 073108 (2005)
- [7] Ye, J., Swartz, S., Jungner, P., and Hall, J. L., "Hyperfine structure and absolute frequency of the 87Rb $5P_{3/2}$ state", Opt. Lett. 21, 1280 (1996).
- [8] Bitou, Y., Sasaki, K., Inaba, H., Hong, F.-L., Onae, A., "Rubidium-stabilized diode laser for high-precision interferometer", Opt. Eng. 43, 900 (2004).

ÖZGEÇMİŞ

Ersoy ŞAHİN

1975 yılında Ankara'da doğdu. Ankara Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 1998, Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü'nde sırası ile 2005 ve 2014 yıllarında tamamlamıştır. 1999 yılından beri TÜBİTAK UME Zaman - Frekans & Dalga boyu Laboratuvarı'nda Başuzman Araştırmacı ünvanıyla çalışmaktadır. Birincil ve ikincil seviye dalga boyu standartlarının kurulması, uluslararası izlenebilirliğin sağlanması, ikinci seviye dalga boyu standartlarının kalibrasyon ve test hizmetlerini verilmesi, atomik saatler ve optik saatlerin kurulması çalışmalarında görev almaktadır. Uzmanlık alanı lazer atom etkileşimi, lazerlerin metrolojik uygulamaları, atomik ve optik saatlerdir.